

**MAGNETOMETRE A CIRCUIT MAGNETIQUE OUVERT ET SON PROCEDE
DE REALISATION**

DESCRIPTION

5 DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention se rapporte au domaine des magnétomètres ou capteurs magnétiques.

Elle concerne en particulier un dispositif microélectronique comprenant un magnétomètre à fluxgate
10 intégré ou magnétomètre à micro-fluxgate amélioré ainsi qu'un procédé de réalisation d'un tel dispositif.

Par magnétomètre intégré, on entend un circuit réalisé en couches minces, utilisé pour la mesure de champ magnétique ou de variation de champ
15 magnétique

ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE

Un magnétomètre et en particulier un magnétomètre à fluxgate, comprend généralement un circuit magnétique comportant des connexions et un
20 noyau magnétique par exemple à base d'un matériau amorphe ou d'un alliage magnétique, par exemple en Permalloy. Il comprend généralement en outre un circuit d'excitation du noyau. Ce circuit d'excitation comporte de préférence au moins un bobinage d'excitation chargé
25 de l'excitation du circuit magnétique et un circuit de détection comportant au moins un bobinage récepteur ou bobinage de détection chargé de la mesure. Ces éléments fonctionnent en collaboration. Dans le cas du magnétomètre à fluxgate, le circuit d'excitation
30 réalise une excitation alternative du noyau.

Un circuit magnétique « ouvert » se présente couramment sous forme d'un agencement d'une ou plusieurs branches ou segments de formes diverses à base de matériau magnétique et comportant des
5 extrémités reliées ou non entre elles.

Les branches du noyau d'un circuit magnétique ouvert sont agencées généralement de manière à ce qu'elles ne réalisent pas de boucle ou de contour fermé. Un noyau magnétique ouvert comporte au moins
10 deux extrémités non connectées entre elles.

Les magnétomètres à micro-fluxgate peuvent s'appliquer au domaine de la microélectronique et être incorporés par exemple dans des circuits intégrés. Ils sont alors fabriqués grâce à des techniques de
15 réalisation en couches minces. Les magnétomètres à fluxgate formés en couches minces peuvent atteindre des tailles d'un ordre inférieur au millimètre, avec des couches minces pouvant être de l'ordre du micromètre et sont alors appelés magnétomètres à micro-fluxgate.

20 Les magnétomètres à micro-fluxgate trouvent emploi dans des mesures de champs magnétiques pouvant être faibles ou même très faibles. Ils peuvent ainsi servir par exemple à mesurer des variations très faibles du champ magnétique terrestre. Ainsi, certains
25 magnétomètres à micro-fluxgate ont une sensibilité de l'ordre de quelques nanoteslas ou même de l'ordre du picotesla suivant les dimensions du magnétomètre. Par ailleurs, on souhaite continuellement pouvoir augmenter la sensibilité des magnétomètres et notamment des
30 magnétomètres à micro-fluxgate, mais des phénomènes de bruit non négligeables apparaissent au fur et à mesure

que l'ordre de grandeur des mesures de champs magnétiques ou de fluctuations de champs magnétiques diminue.

Un certain type de bruit apparaît notamment de manière spécifique dans les magnétomètres à micro-fluxgate comportant un circuit magnétique ouvert. Ce genre de bruit résulte notamment du fait que dans un tel type de dispositif, les dimensions du noyau magnétique sont du même ordre de grandeur que celles des domaines magnétiques.

Lors des mesures de champs magnétiques de de champ faible, le niveau de bruit peut rendre les mesures très délicates. D'autre part, les phénomènes de bruits sont aléatoires. Ils peuvent provenir par exemple de l'hystérésis relative au matériau magnétique compris dans le noyau magnétique, ou bien du mouvement imprévisible de domaines magnétiques dans les couches minces.

Pour lutter contre les phénomènes de bruit, une méthode connue de l'art antérieur consiste à appliquer un champ magnétique supplémentaire orthogonal au champ magnétique mesuré, ce qui permet d'obtenir une meilleure polarisation du circuit magnétique sans influencer sur la mesure effectuée par le circuit de détection. Cette méthode comporte néanmoins plusieurs inconvénients. Elle nécessite en effet d'inclure dans le magnétomètre un circuit supplémentaire servant à appliquer le champ magnétique supplémentaire. Cela complique l'intégration ainsi que le procédé de réalisation du capteur magnétique.

D'autre part l'ajout du circuit supplémentaire augmente de façon non négligeable la consommation en courant du magnétomètre, ce qui peut être dommageable lorsque les magnétomètres sont
5 intégrés à des dispositifs microélectroniques de tailles très faibles.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention permet de diminuer les phénomènes de bruit dans les magnétomètres ou
10 capteurs magnétiques à micro-fluxgate dotés d'un circuit magnétique « ouvert ». Elle propose un dispositif microélectronique amélioré comprenant un magnétomètre à micro-fluxgate, qui comprend des moyens pour lutter contre les phénomènes de bruit, ainsi qu'un
15 procédé de réalisation d'un tel magnétomètre à micro-fluxgate. Par rapport à la solution de l'art antérieur présentée plus haut, l'invention, dans sa forme la plus avantageuse est plus simple à réaliser, elle permet par ailleurs un gain de place et induit peu ou pas de
20 consommation de courant supplémentaire.

L'invention met en œuvre un magnétomètre à micro-fluxgate ou magnétomètre à fluxgate intégré comprenant :

- un circuit magnétique ouvert comportant au moins un
25 noyau magnétique à base de matériau magnétique doté d'au moins deux extrémités libres,
- un ou plusieurs bobinages de détection enroulés autour du noyau,
- un ou plusieurs bobinages d'excitation enroulés
30 autour du noyau magnétique, de manière à permettre à

l'ensemble du matériau magnétique d'atteindre la saturation.

Les bobinages d'excitation peuvent être agencés de manière à induire un champ magnétique d'excitation du noyau uniforme.

Selon un mode de réalisation, les bobinages d'excitation peuvent être agencés de sorte qu'au moins un des bobinages d'excitation dépasse d'au moins une des extrémités libres du noyau.

L'invention prévoit également un magnétomètre à micro-fluxgate ou un magnétomètre à fluxgate intégré comprenant :

- un circuit magnétique ouvert comportant au moins un noyau magnétique doté d'au moins deux extrémités libres,
- un ou plusieurs bobinages de détection enroulés autour du noyau,
- un ou plusieurs bobinages d'excitation enroulés autour du noyau magnétique, au moins un des bobinages d'excitation dépassant d'au moins une des extrémités libres du noyau.

Les bobinages d'excitation et de détection peuvent être distincts, ou confondus dans certains cas.

Le dépassement du bobinage d'excitation d'au moins une des extrémités du noyau permet de limiter les phénomènes de bruit dans le magnétomètre. Les phénomènes de bruit proviennent en partie de zones magnétiques insaturées dans le circuit magnétique. Ainsi le dépassement du bobinage d'excitation permet de saturer les extrémités du noyau magnétique. Lorsque ce dépassement s'applique à toutes les extrémités du

noyau, on réduit au maximum la présence de zones magnétiques insaturées dans le magnétomètre. Par ailleurs l'invention s'applique à un circuit magnétique ouvert, c'est-à-dire que les branches du noyau magnétique ne réalisent pas de contour fermé ni de boucle mais possèdent au moins deux extrémités libres, c'est-à-dire non connectées.

L'invention concerne les magnétomètres à fluxgate intégré ou micro-fluxgate c'est-à-dire ceux compris dans un circuit intégré ou dans une puce. L'invention concerne également les dispositifs microélectroniques de mesure de champ ou de variation de champ magnétique à fluxgate intégré comportant un circuit magnétique ouvert.

Le magnétomètre suivant l'invention peut comprendre en outre un générateur de courant couplé aux bobinages d'excitation pour fournir le courant d'excitation, et des moyens de mesure couplés aux bobinages de détection.

Selon une caractéristique particulière du magnétomètre, un des bobinage d'excitation peut comprendre au moins une spire dépassant entièrement d'au moins une des extrémités du noyau magnétique

Selon une autre caractéristique particulière du magnétomètre suivant l'invention, les bobinage d'excitations peuvent avoir une largeur l_{be} , un des bobinage d'excitation peut alors dépasser d'au moins d'une des extrémités du noyau magnétique d'une longueur de dépassement D supérieure à $(1/10)l_{be}$. Cette longueur D de dépassement correspond approximativement à la limite de la zone où le champ magnétique reste

constant et ne se trouve pas diminué par des effets de bord. Fixer une longueur de dépassement D supérieure à $(1/10)l_{be}$ permet de limiter davantage les instabilités provenant du noyau magnétique.

5 Pour saturer de façon complète le noyau magnétique, il peut s'avérer utile que les bobinages d'excitations enroulés autour du noyau recouvrent ce dernier complètement et aient une longueur totale cumulée supérieure à la longueur totale cumulée des
10 longueurs des branches du noyau. Ainsi, selon une caractéristique particulière de l'invention, le noyau magnétique a une longueur totale $L_{noy\text{tot}}$, correspondant à la somme de toutes les longueurs des branches du noyau, et les bobinages d'excitation ont une longueur totale
15 L_{betot} , correspondant à la somme des longueurs de l'ensemble des bobinages d'excitation, L_{betot} pouvant être supérieure à $L_{noy\text{tot}}$.

 Selon une autre caractéristique particulière du magnétomètre suivant l'invention, les
20 bobinages d'excitation et les bobinages de détection peuvent être au moins partiellement entrelacés. Cette configuration n'est pas obligatoire mais peut permettre un gain de place dans le magnétomètre. Les bobinages de détection et d'excitation sont généralement entrelacés
25 sauf aux extrémités et au-delà des extrémités du noyau magnétique. Les bobinages d'excitation et de détection peuvent aussi être juxtaposés autour du noyau.

 Selon une autre caractéristique particulière du magnétomètre à micro-fluxgate suivant
30 l'invention, celui-ci peut comprendre en outre un circuit de compensation apte à appliquer un champ

magnétique compensant un champ magnétique, par exemple continu ou basse fréquence, à mesurer.

Le circuit de compensation peut être formé de connexions et de bobinages de compensation aussi
5 appelés bobinages de réaction enroulés autour du noyau magnétique. Ces bobinages de compensation peuvent permettre d'appliquer un champ magnétique compensant un champ magnétique continu ou basse fréquence à mesurer.

Les bobinages de compensation peuvent être
10 distincts ou confondus avec les bobinages de détection.

Le magnétomètre à micro-fluxgate suivant l'invention peut être réalisé en couche minces et intégré dans des puces ou dispositifs microélectroniques. Un magnétomètre de taille d'ordre
15 inférieure au micromètre peut s'appliquer à de nombreux domaines de l'industrie et par exemple trouver des applications dans le domaine aérospatial ou médical.

L'invention concerne enfin un procédé de réalisation du magnétomètre à micro-fluxgate
20 comprenant : la formation d'un noyau magnétique doté d'au moins deux extrémités libres, ainsi que la formation d'un ou plusieurs bobinages de détection enroulés autour du noyau ainsi qu'un ou plusieurs bobinages d'excitation enroulés autour du noyau
25 magnétique, un des bobinages d'excitation dépassant d'au moins une des extrémités du noyau.

Le procédé suivant l'invention peut comprendre une première sous étape consistant à former des portions inférieures desdits bobinages de détection
30 et d'excitation préalablement à l'étape de formation du noyau, ainsi qu'une seconde sous étape consistant à

former des portions supérieures desdits bobinages de détection et d'excitation après l'étape de formation du noyau.

La seconde sous étape peut être réalisée après une étape de formation de raccords verticaux servant à relier les portions inférieures et supérieures desdits bobinages de détection et d'excitation.

L'étape de formation du noyau peut être réalisée sur une couche diélectrique. Selon une caractéristique particulière du procédé suivant l'invention une planarisation de ladite couche diélectrique est effectuée préalablement à l'étape de formation du noyau. Cette étape de planarisation, préalable à la formation du noyau, peut permettre d'obtenir un noyau magnétique plane, donc moins susceptible d'être la source de phénomènes de bruit.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels:

les figures 1 à 3 représentent différentes variantes de magnétomètre ou dispositif de mesure de champ magnétique à micro-fluxgate selon l'invention;

la figure 4 représente une vue en coupe d'une partie de l'exemple de magnétomètre à micro-fluxgate suivant l'invention illustré sur la figure 1. La coupe est réalisée selon un axe x'x représenté sur la figure 1 ;

les figures 5A-5G représentent différentes étapes d'un exemple de procédé de réalisation d'un magnétomètre à micro-fluxgate suivant l'invention.

Des parties identiques, similaires ou
5 équivalentes des différentes figures portent les mêmes références numériques de façon à faciliter le passage d'une figure à l'autre.

Les différentes parties représentées sur les figures ne le sont pas nécessairement selon une
10 échelle uniforme, pour rendre les figures plus lisibles.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

La figure 1 représente un exemple de dispositif suivant l'invention formé d'un magnétomètre
15 ou capteur magnétique à micro-fluxgate ou capteur à fluxgate intégré, c'est-à-dire un magnétomètre à fluxgate compris dans un dispositif microélectronique tel qu'un MEMS (MEMS pour micro système électro-mécanique) ou une puce.

20 Le magnétomètre comprend un circuit magnétique comportant des connexions 104 et un noyau magnétique 101 qui se présente, dans cet exemple, sous forme de deux branches 102 et 103 rectilignes sensiblement rectangulaires et parallèles entre elles.

25 L'invention s'applique à des noyaux magnétiques ayant d'autres formes et pouvant comprendre une ou plusieurs branches agencées différemment des branches 102 et 103 illustrées sur la figure 1. Cependant, l'invention concerne un circuit magnétique
30 « ouvert », dont les branches ne réalisent pas de

boucle ou de contour fermé. Ainsi, le noyau magnétique 101 possède plusieurs extrémités libres, c'est-à-dire non connectées, et notées 102a, 103a sur la figure 1.

Le noyau magnétique 101 peut être réalisé à
5 base de tout type de matériau magnétique tel qu'un matériau magnétique amorphe, un matériau magnétique doux, un alliage tel que par exemple un alliage à base de fer et de nickel, ou bien un alliage à base de fer et de cobalt, ou bien un alliage à base de fer de
10 nickel et d'indium. Par ailleurs, le noyau magnétique 101 peut être réalisé par un empilement de plusieurs couches de matériaux différents.

Le magnétomètre comprend également un circuit d'excitation comportant des connexions notées
15 123, ainsi qu'un premier bobinage d'excitation et un second bobinage d'excitation notés respectivement 121 et 122 et enroulés respectivement autour des branches 102 et 103 du noyau 101 du circuit magnétique. Les bobinages d'excitation 121 et 122 sont reliés à un
20 générateur (non représenté) leur fournissant un signal alternatif et agencés de manière à créer un champ magnétique d'excitation dans le noyau magnétique 101.

Les bobinages d'excitation 121, 122 ont chacun une largeur l_{be} et une longueur L_{be} . Ils
25 entourent le noyau magnétique sur toute sa longueur de sorte que plusieurs spires S des bobinages d'excitation dépassent des extrémités libres 102a, 103a, du noyau 101.

Le fait qu'au moins une des extrémités 102a
30 ou 103a du noyau magnétique 101 se retrouve complètement à l'intérieur d'un des bobinages

d'excitation 121 ou 122 permet d'assurer une saturation du noyau magnétique 101 à l'aide d'un champ d'excitation uniforme.

Le bobinage d'excitation 121 peut dépasser des extrémités du noyau 101 d'une longueur de dépassement notée D et supérieure à $(1/10)l_{be}$. Ainsi, le noyau magnétique 101 saturé jusque dans ses extrémités se trouve dans une zone de champ magnétique constant.

Le noyau magnétique 101 a une longueur totale $L_{noy\text{tot}}$ égale à la longueur cumulée de ses branches 102 et 103. Les bobinages d'excitation 121 et 122 ont chacun une longueur L_{be} , ce qui implique une longueur cumulée des bobinages d'excitation L_{betot} égale à $2L_{be}$.

Selon une caractéristique particulière de l'invention, L_{betot} peut être supérieur à $L_{noy\text{tot}}$, c'est-à-dire que le bobinage peut recouvrir le noyau 101 dans sa totalité et peut dépasser ainsi de toutes les extrémités du noyau 101. Ainsi, toutes les extrémités du noyau 101 peuvent être saturées et les phénomènes de bruit pouvant provenir de certaines zones insaturées du noyau sont atténués.

Le magnétomètre à micro-fluxgate suivant l'invention comprend également un circuit de détection comportant des connexions notées 113 ainsi qu'un premier et un second bobinage de détection notés respectivement 111 et 112 et enroulés chacun autour d'une partie des branches 102 et 103 du noyau 101 du circuit magnétique.

Le premier et second bobinage de détection 111 et 112 sont dans cet exemple entrelacés

respectivement avec le premier et second bobinages de d'excitation 121 et 122.

Il faut noter que le nombre de bobinage de détection et d'excitation du magnétomètre suivant l'invention, ainsi que l'agencement des bobinages de détection 111 et 112 ne sont nullement limités à ce qui est illustré à la figure 1. Ainsi l'invention peut comporter un ou plusieurs bobinages d'excitation, un ou plusieurs bobinages de détection entrelacés ou non avec les bobinages de détection.

D'autre part, le nombre de spires des bobinages de détection 111, 112 et des bobinages d'excitation 121, 122, ainsi que la densité d'enroulement (nombre de spires sur une unité de longueur) ne sont pas représentés à l'échelle sur la figure 1, des densités d'enroulement et des nombres de spires autres étant possibles.

La figure 2 présente un second exemple de magnétomètre à micro-fluxgate suivant l'invention qui diffère de l'exemple illustré par la figure 1 en ce que le magnétomètre comprend en outre un circuit de compensation, comportant des connexions notées 133 ainsi que deux bobinages de réaction ou bobinages de compensation 131 et 132 enroulés respectivement autour des branches 102 et 103 du noyau. Les bobinages de compensation 131 et 132 peuvent être entrelacés avec les bobinages d'excitation 121 et 122. Ces bobinages de réaction 131 et 132 peuvent permettre d'appliquer un champ magnétique compensant un champ magnétique continu ou basse fréquence à mesurer.

Lorsque le magnétomètre ne comporte pas de bobinage de réaction, les bobinages de détection 111 et 112 peuvent jouer le rôle des bobinages de compensation 131 et 132.

5 La figure 3 présente un autre exemple de magnétomètre à micro-fluxgate suivant l'invention doté d'un circuit d'excitation comprenant un générateur de courant alternatif 125 relié par l'intermédiaire de connexions 123 aux bobinages d'excitation 121 et 122.
10 Le circuit de détection comprend en outre un moyen de mesure 115 relié par l'intermédiaire de connexions 113 aux bobinages de détection 111 et 112.

Le magnétomètre suivant l'invention peut être réalisé en couches minces. La figure 4 représente
15 une vue en coupe selon l'axe x'x d'une partie du magnétomètre illustré sur la figure 1.

Le magnétomètre à fluxgate intégré ou à micro-fluxgate est réalisé par un empilement de couches minces. Une couche isolante inférieure 401 par exemple
20 à base d'un matériau isolant tel que du SiO₂ ou bien tel qu'un polymère photosensible d'épaisseur par exemple comprise entre 1 et 10 micromètres, par exemple égale 5 micromètres repose sur un substrat 400 par exemple à base de silicium. La couche isolante
25 inférieure 401 comporte des portions inférieures 402 de bobinages d'excitation 121 et de bobinages de détection 111. Ces portions inférieures 402 de bobinages se présentent sous forme de lignes conductrices s'étendant dans une direction sensiblement orthogonale à x'x et
30 parallèle à un plan principal du substrat. Les portions inférieures 402 de bobinages ont par ailleurs une forme

rectangulaire dans cet exemple. En outre, les portions inférieures 402 de bobinages peuvent être réalisées à base de matériaux métalliques par exemple tels que du cuivre, de l'aluminium, de l'or...

5 Sur la couche isolante inférieure 401 repose une première couche diélectrique 403, par exemple à base de SiO_2 d'épaisseur située par exemple entre 1 et 10 micromètres, par exemple égale à 3 micromètres. Cette première couche diélectrique 403
10 s'intercale entre les portions inférieures 402 des bobinages 121 et 111 situés au dessous d'elle et un noyau magnétique 101 contenu dans une couche 404 diélectrique située au dessus d'elle. Ainsi, le noyau magnétique 101 et les portions inférieures 402 des
15 bobinages sont isolés. Le noyau magnétique 101 s'étend dans une direction parallèle à l'axe $x'x$ sur une longueur notée L_{noy} . Il peut être formé à base d'un matériau magnétique tel qu'un matériau magnétique doux, un matériau magnétique amorphe, ou bien un alliage tel
20 que par exemple un alliage à base de fer et de nickel. Le noyau peut être formé en une seule couche ou par un empilement de plusieurs couches de matériaux différents et avoir une épaisseur comprise par exemple entre 500 nanomètres et 5 micromètres par exemple proche de 1
25 micromètre.

Sur la couche 404 contenant le noyau 101 se trouve une seconde couche diélectrique 405 par exemple à base de SiO_2 et d'épaisseur située entre 1 et 10 micromètres, par exemple égale à 3 micromètres.

30 La seconde couche diélectrique 405 sert d'isolation entre le noyau 101 situé au dessous d'elle

et des portions supérieures 407 des bobinages 111 et 121 situées au dessus d'elle insérés dans une couche 406 située sur la seconde couche diélectrique 405.

5 Ces portions supérieures 407 de bobinages se présentent sous forme de lignes conductrices s'étendant dans une direction orthogonale à $x'x$ et parallèles à un plan principal du substrat. Les portions supérieures 407 de bobinages ont une forme rectangulaire. Les portions supérieures 407 de
10 bobinages peuvent être réalisées à base de matériaux métalliques par exemple tels que du cuivre, de l'aluminium, de l'or...

Les couches 403, 404, 405, sont percées de manière à recevoir des raccordements verticaux 408 par
15 exemple à base de métal joignant les portions inférieures 402 et les portions supérieures 407 des bobinages 111 et 121.

Les portions inférieures 402 et supérieures 407 des bobinages 111 et 121 reliées par les
20 raccordements verticaux 408 produisent des spires de forme rectangulaires.

Le bobinage d'excitation 121 s'étend dans direction parallèle à celle du noyau 101 sur une longueur L_{be} supérieure à la longueur L_{noy} du noyau

25 Ainsi, le bobinage d'excitation 121 est enroulé autour du noyau 101 et recouvre la totalité de ce dernier. De plus, le bobinage d'excitation 121 dépasse des extrémités 102a du noyau 101 d'une longueur de dépassement D pour une extrémité et d'une longueur
30 de dépassement D' différente de D pour l'autre extrémité. Cette configuration où le bobinage

d'excitation 121 dépasse des extrémités du noyau 101 permet d'améliorer la saturation du circuit magnétique et de limiter ainsi les phénomènes de bruit dans le magnétomètre.

5 Des plots de connexion 409 par exemple à base d'un matériau métallique sont également insérés dans la couche 406 et servent par exemple au passage de courant depuis des circuits extérieurs vers les différents bobinages ou depuis les différents bobinages
10 vers des circuits extérieurs.

Le dispositif représenté à la figure 4 peut être obtenu par un procédé de fabrication dont un exemple est illustré par les figures 5A à 5H.

La première étape de ce procédé consiste à
15 former la couche isolante inférieure 401 par exemple d'épaisseur comprise entre 2 et 5 micromètres, par exemple par dépôt chimique en phase vapeur d'un matériau isolant ou bien par croissance d'oxyde tel que du SiO_2 sur le substrat 400. Ensuite, on réalise
20 dans la couche isolante 401 plusieurs tranchées 500 juxtaposées et s'étendant dans une direction parallèle à un plan principal du substrat 400 et orthogonale à l'axe $x'x$ (figure 5A). Les tranchées 500 peuvent avoir par exemple une profondeur comprise entre 1 et 3
25 micromètres. Elles peuvent être réalisées par des méthodes classiques de photolithographie puis de gravure de la couche isolante 401.

On effectue ensuite un remplissage des tranchées par un matériau conducteur 501 par exemple à
30 base de cuivre de sorte que le matériau conducteur comble les tranchées 500 et qu'une épaisseur 502 du

matériau conducteur dépasse de la surface de la couche isolante 401. Le remplissage peut se faire par exemple par électrolyse de cuivre ou par dépôt tel qu'un dépôt chimique en phase vapeur (figure 5B).

5 Ensuite, on effectue le polissage de la l'épaisseur 502 du matériau conducteur 501 jusqu'à atteindre la surface de la couche isolante 401, par exemple par méthode CMP (CMP pour « polissage mécanico-chimique »). Les tranchées 500 remplies par le matériau
10 conducteur 501 par exemple à base de cuivre forment les portions inférieures 402 des bobinages 111 et 121 illustrés précédemment à la figure 4.

 Ensuite, on effectue un dépôt d'épaisseur située entre 1 et 8 micromètres, par exemple par
15 méthode de dépôt chimique en phase vapeur de la première couche diélectrique 403, réalisée par exemple à base de SiO_2 . On peut alors procéder à un polissage tel qu'un polissage mécanico-chimique (CMP) de la première couche diélectrique 403.

20 Ensuite, on forme le noyau magnétique 101 sur la première couche diélectrique 403 par exemple par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur ou par pulvérisation cathodique d'une couche ou d'un empilement 503 de plusieurs couches à base de matériau
25 magnétique. La couche ou l'empilement 503 a une épaisseur située par exemple entre 100 nanomètres et 5 micromètres, par exemple égale à 1 micromètre. La couche 503 peut être réalisée à base d'un matériau magnétique tel qu'un matériau magnétique doux, ou bien
30 un matériau magnétique amorphe. Elle peut comprendre un alliage tel que par exemple un alliage à base de fer et

de nickel ou alliage « permalloy », ou bien un alliage à base de fer et de cobalt, ou bien un alliage à base de fer de nickel et d'indium. La couche 503 peut comprendre tout type de matériau pouvant former un
5 noyau magnétique. Elle est de préférence la plus plane possible, car la non planéité du noyau magnétique peut induire du bruit magnétique supplémentaire dans le magnétomètre. Ainsi, la planéité de la couche 503 peut être assurée au moins en partie par l'étape de
10 planarisation de la couche diélectrique 403 évoquée et décrite plus haut. La couche 503 est ensuite gravée afin de former le noyau magnétique 101 sous forme de branches de longueur L_{noy} s'étendant dans une direction parallèle à l'axe $x'x$. Une seconde couche diélectrique
15 405 par exemple d'épaisseur située entre 1 et 5 micromètres, par exemple égale à 2 micromètres est ensuite déposée sur le noyau magnétique 101 et recouvre ce dernier. Dans cet exemple de réalisation, le noyau
20 101 est intégré dans la couche 403. Le diélectrique 404 de la figure 4 correspond alors dans cet exemple particulier à une partie de la couche 403.

On réalise alors des orifices verticaux 504 par exemple par gravure de la seconde couche diélectrique 405 contenant le noyau 101 et de la
25 première couche diélectrique 403. Les orifices verticaux 504 atteignent les portions inférieures 402 des bobinages (figure 5D).

Ces orifices verticaux 504 sont ensuite remplis par électrolyse ou par dépôt d'un matériau
30 conducteur 505 par exemple à base de cuivre, d'aluminium, etc. Les orifices verticaux 504 remplis

forment les raccords métalliques verticaux 408 orthogonaux aux portions inférieures 402 des bobinages et au noyau magnétique 101. Après formation des raccords 408, on effectue le dépôt d'une épaisseur de
5 matériau métallique 506 comprise par exemple entre 1 micromètre et 5 micromètres et à base de cuivre, ou bien d'or ou bien d'aluminium. Selon une variante l'épaisseur de matériau métallique 506 est obtenue par prolongement de l'étape d'électrolyse ou de dépôt du
10 matériau conducteur 505 servant à remplir les orifices verticaux 504 (figure 5E).

On réalise ensuite les portions supérieures 407 des bobinages, par gravure du matériau métallique de sorte que les portions supérieures de bobinages
15 soient reliées par le raccordement vertical 408 aux portions inférieures 402 pour former des spires s de bobinages (figure 5F). Parmi les bobinages ainsi formés, le bobinage d'excitation noté 121 est enroulé autour du noyau 101, de sorte qu'il entoure et dépasse
20 des extrémités notées 102a du noyau 101 d'une longueur de dépassement D.

Enfin, on réalise la couche 406 par exemple par dépôt d'un matériau isolant 505 enrobant les portions supérieures 407 de bobinages. Cette couche 406
25 est alors ajourée pour y insérer des plots de connexion 409.

REVENDICATIONS

1. Magnétomètre à micro-fluxgate
comprenant :
- un circuit magnétique ouvert comportant au moins un
5 noyau magnétique à base de matériau magnétique (101)
doté d'au moins deux extrémités libres (102a, 102b,
103a, 103b),
 - un ou plusieurs bobinages de détection (111,112)
enroulés autour du noyau (101),
 - 10 - un ou plusieurs bobinages d'excitation (121,122)
enroulés autour du noyau magnétique, de manière à
permettre à l'ensemble du matériau magnétique
d'atteindre la saturation.
- 15 2. Magnétomètre à micro-fluxgate selon la
revendication 1, les bobinages d'excitation étant
agencés de manière à induire un champ magnétique
d'excitation du noyau uniforme.
- 20 3. Magnétomètre à micro-fluxgate selon la
revendication 1 ou 2, au moins un des bobinages
d'excitation (121,122) dépassant d'au moins une des
extrémités libres (102a, 102b, 103a, 103b) du noyau
(101).
- 25 4. Magnétomètre à micro-fluxgate selon la
revendication 1 à 3, un des bobinage d'excitation
(121,122) comprenant au moins une spire dépassant
entièrement d'au moins une des extrémités libres (102a,
30 102b, 103a, 103b) du noyau magnétique (101).

5. Magnétomètre à micro-fluxgate selon l'une des revendications 1 à 4 dans lequel les bobinages d'excitations (121,122) ont une largeur l_{be} , au moins un des bobinage d'excitation (121,122) dépassant d'au moins une des extrémités libres (102a, 102b, 103a, 103b) du noyau magnétique (101) d'une longueur de dépassement D supérieure à $(1/10)l_{be}$.

6. Magnétomètre à micro-fluxgate selon l'une des revendications 1 à 5 dans lequel le noyau magnétique (101) a une longueur totale L_{noytot} et les bobinages d'excitation (121,122) ont une longueur totale L_{betot} , L_{betot} étant supérieure à L_{noytot} .

7. Magnétomètre à microfluxgate selon l'une des revendications 1 à 6, les bobinages d'excitation (121,122) et les bobinage de détection (111,112) étant entrelacés.

8. Magnétomètre à micro-fluxgate selon l'une des revendications 1 à 7, le magnétomètre comprenant en outre un circuit de compensation apte à appliquer un champ magnétique compensant un champ magnétique à mesurer.

9. Magnétomètre à micro-fluxgate selon l'une des revendications 1 à 8, le magnétomètre comprenant en outre un générateur de courant couplé au(x) bobinage(s) d'excitation, et des moyens de mesure couplés au(x) bobinage(s) de détection.

10. Magnétomètre à microfluxgate selon l'une des revendications 1 à 9, le magnétomètre étant formé d'un empilement de couches minces.

1 / 7

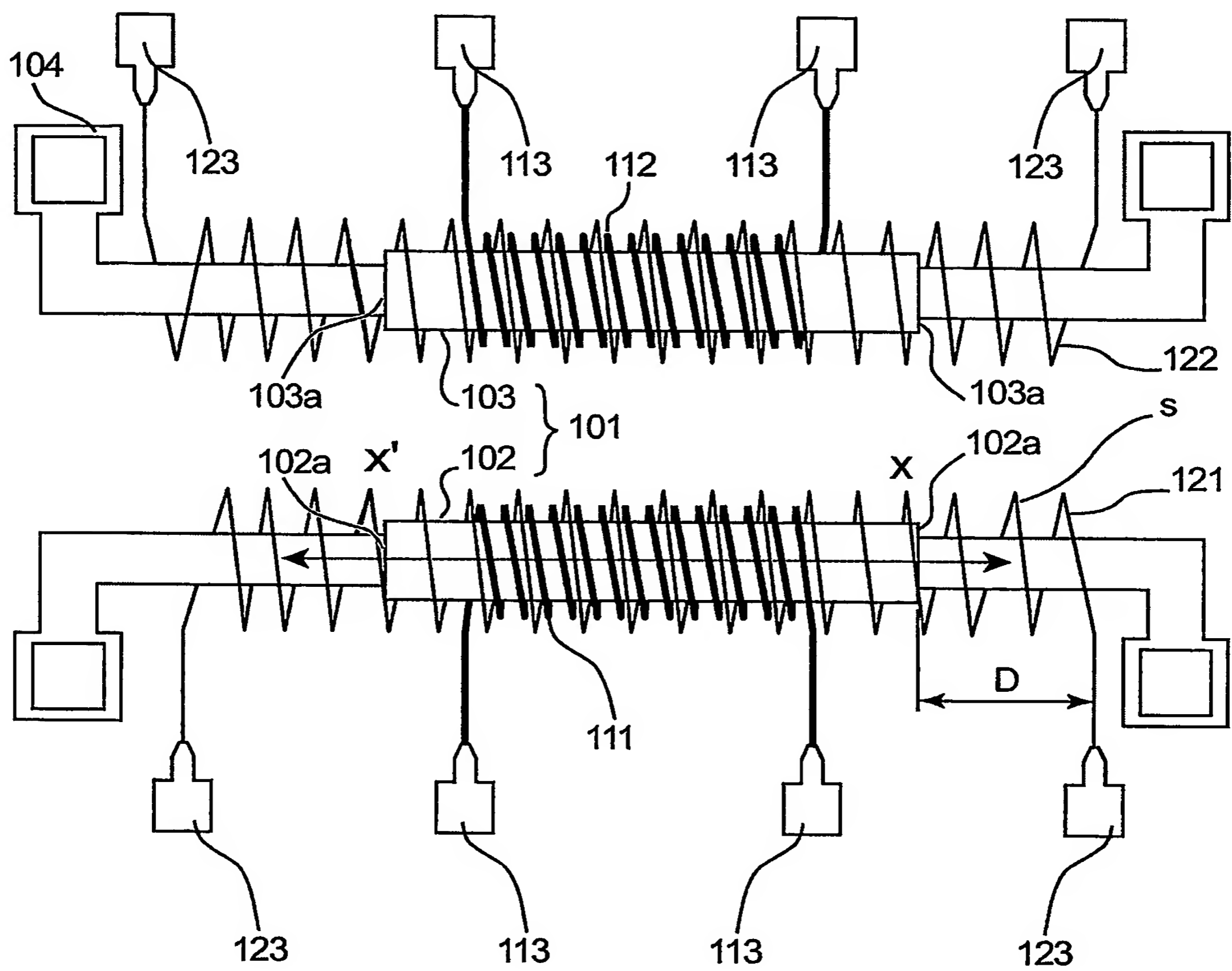


FIG. 1

2 / 7

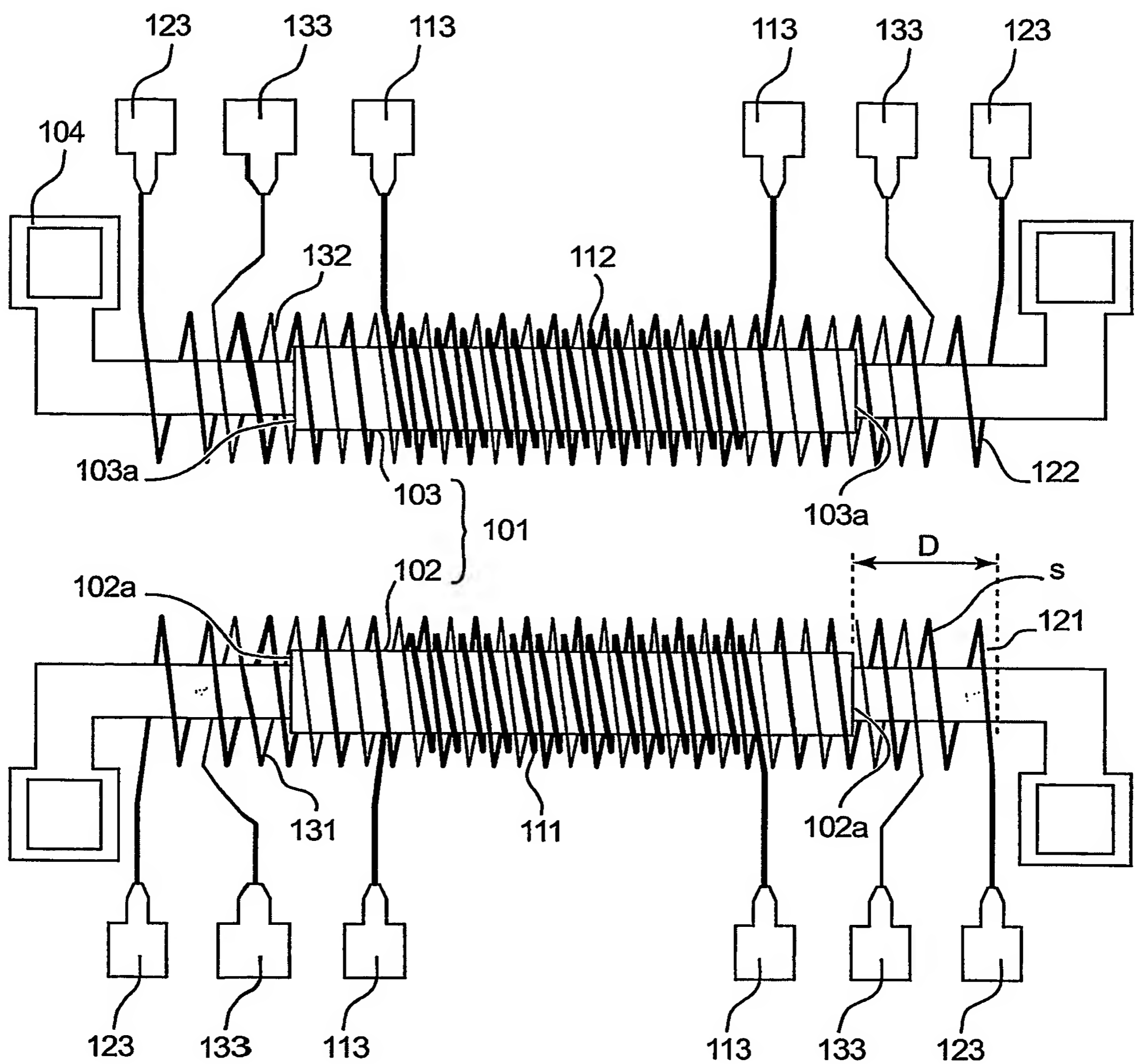


FIG. 2

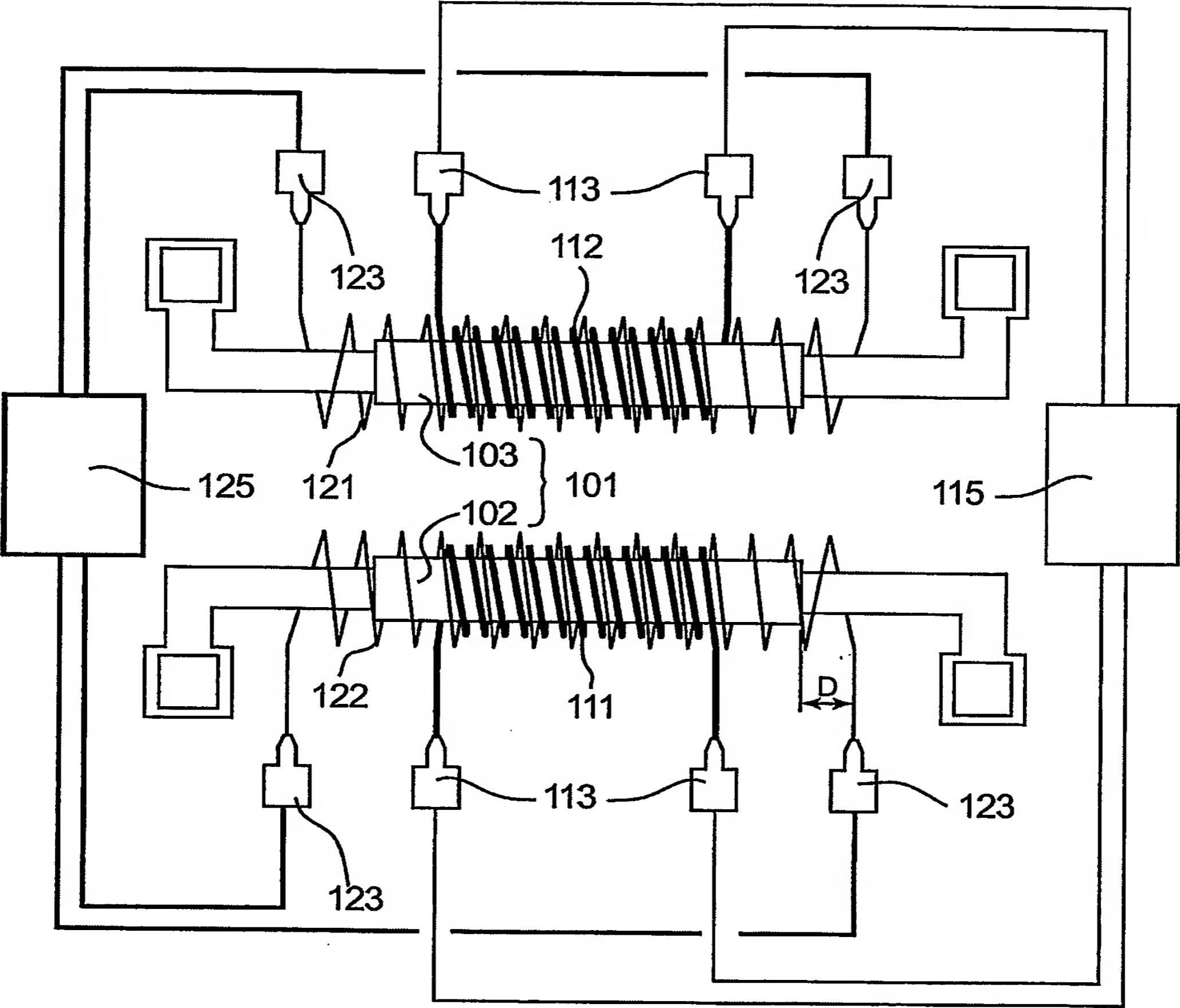


FIG. 3

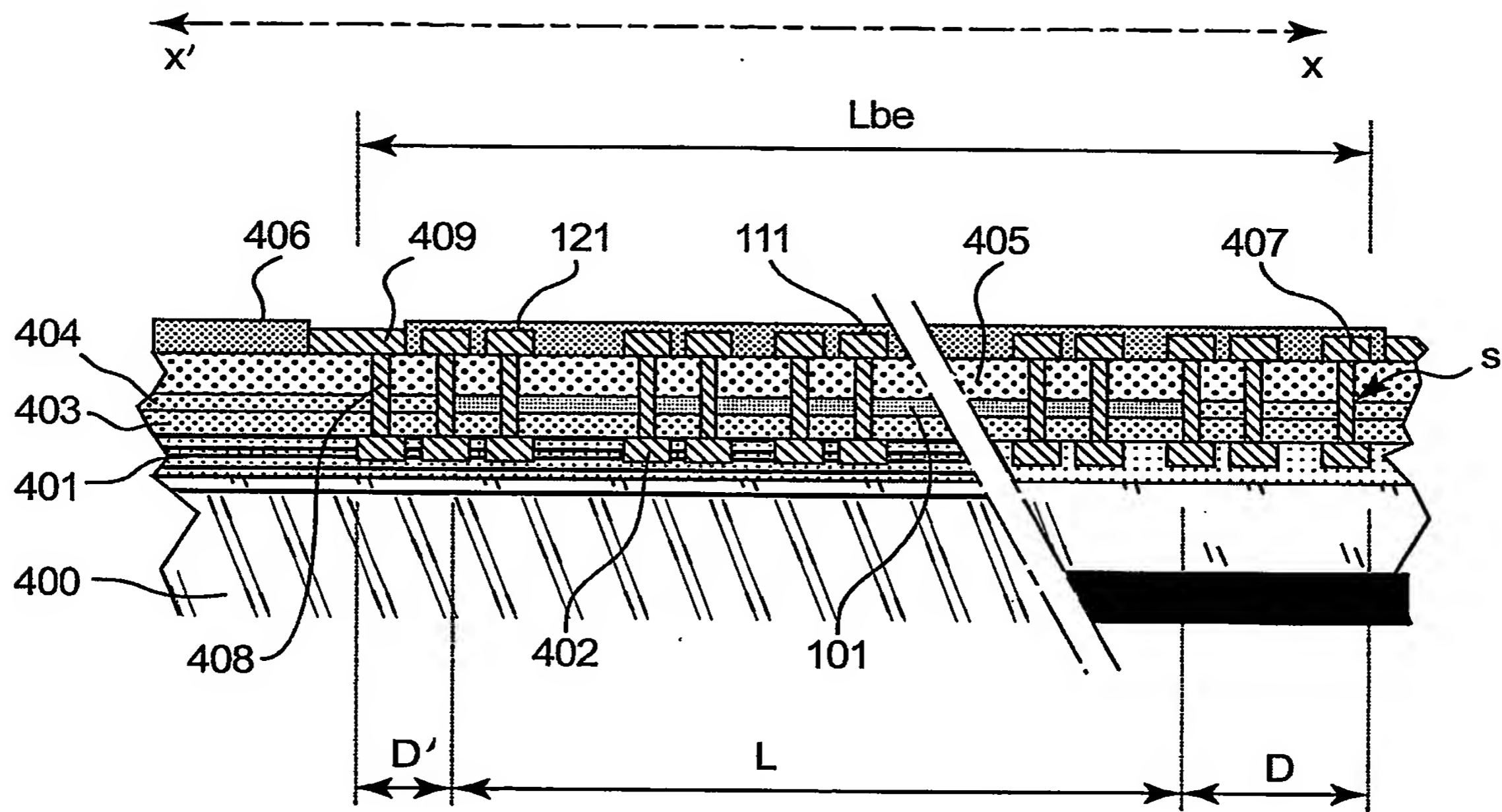


FIG. 4

5 / 7

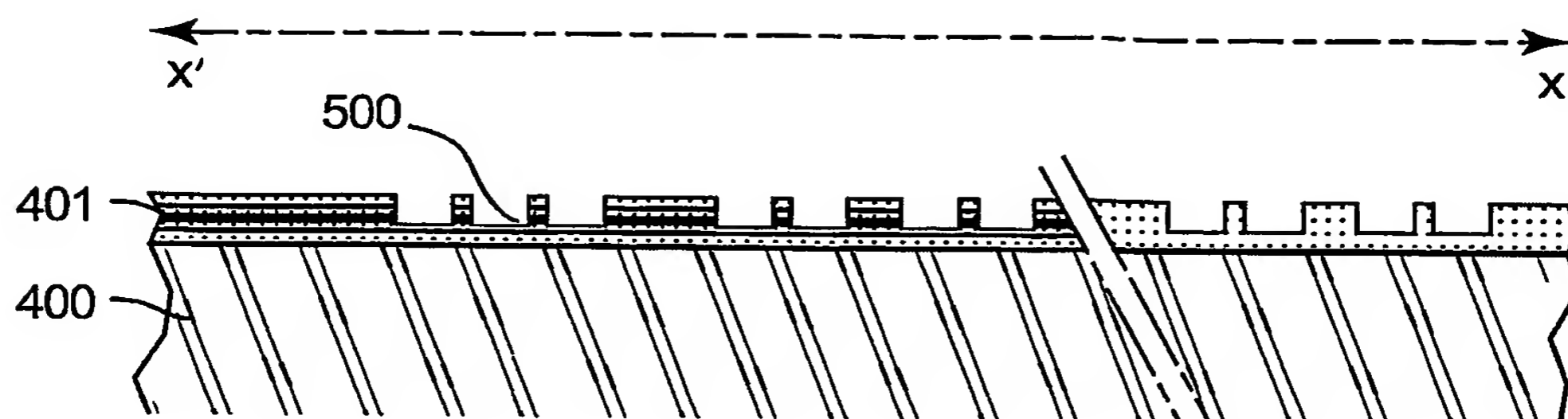


FIG. 5a

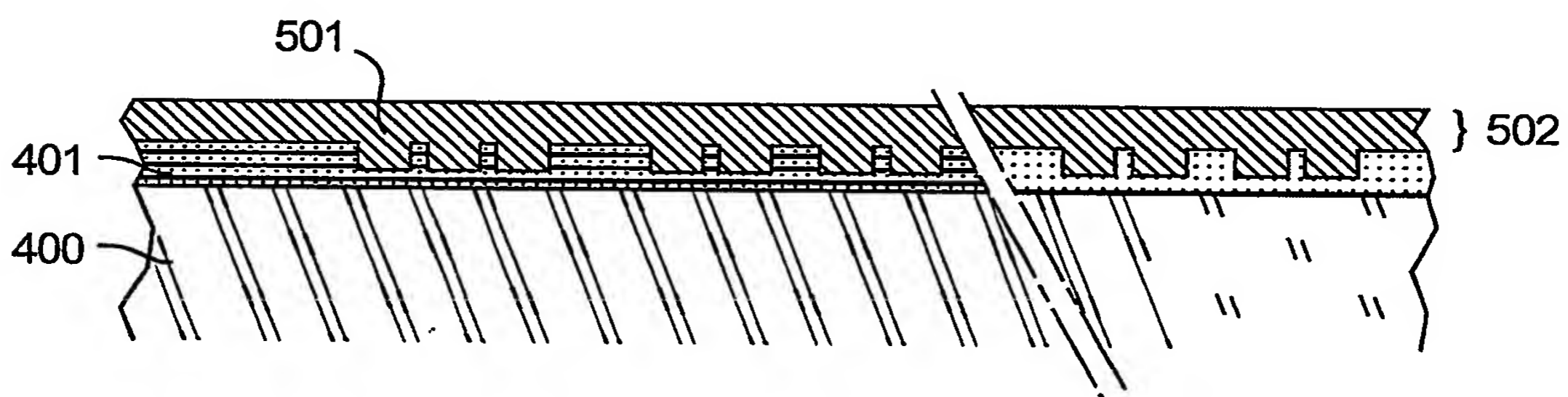


FIG. 5b

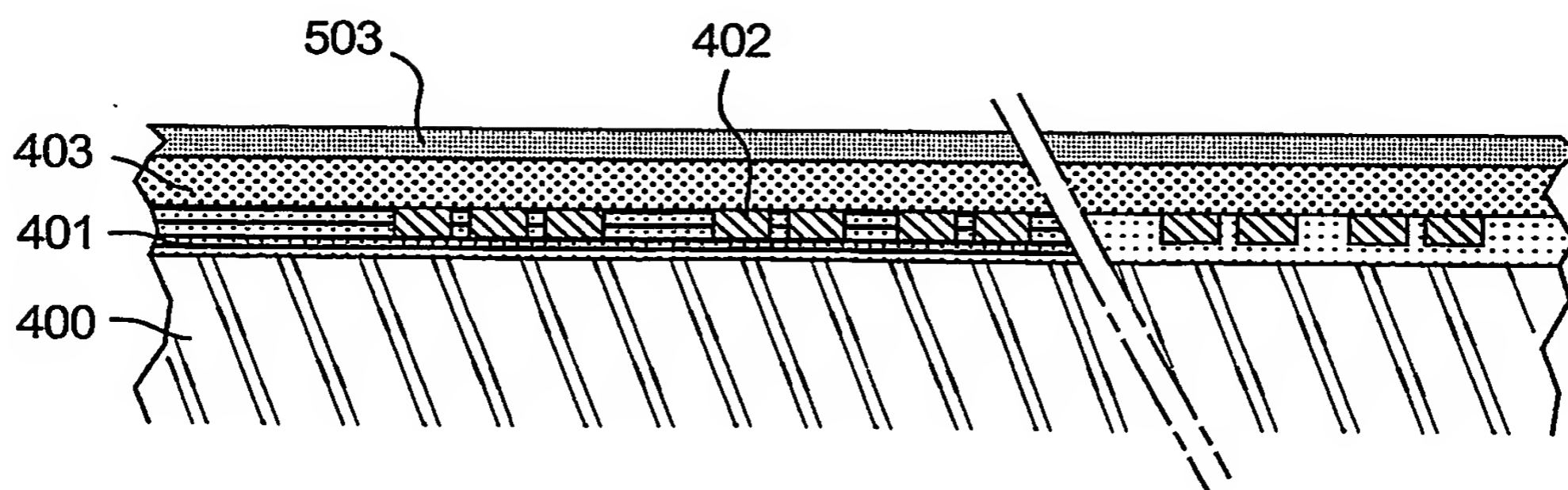


FIG. 5c

6 / 7

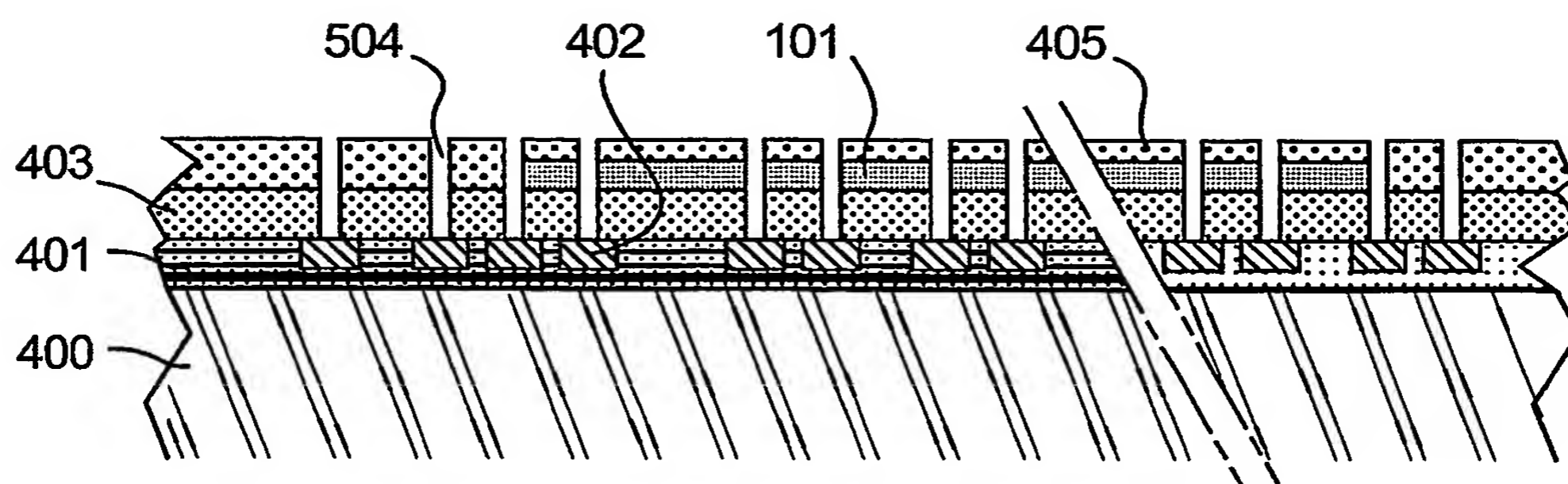


FIG. 5d

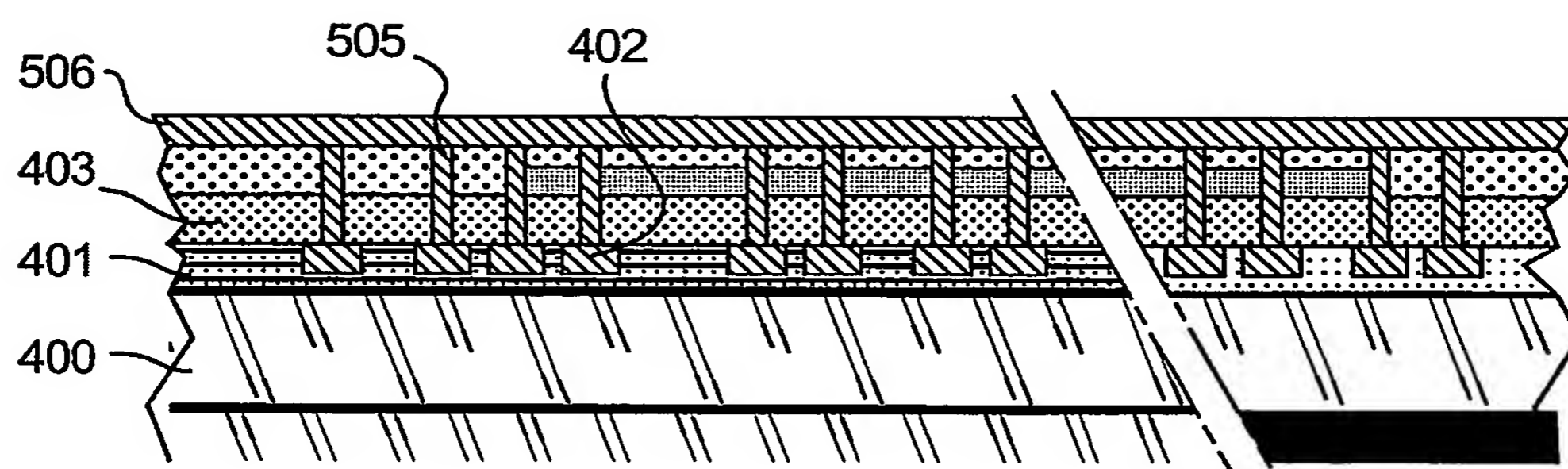


FIG. 5e

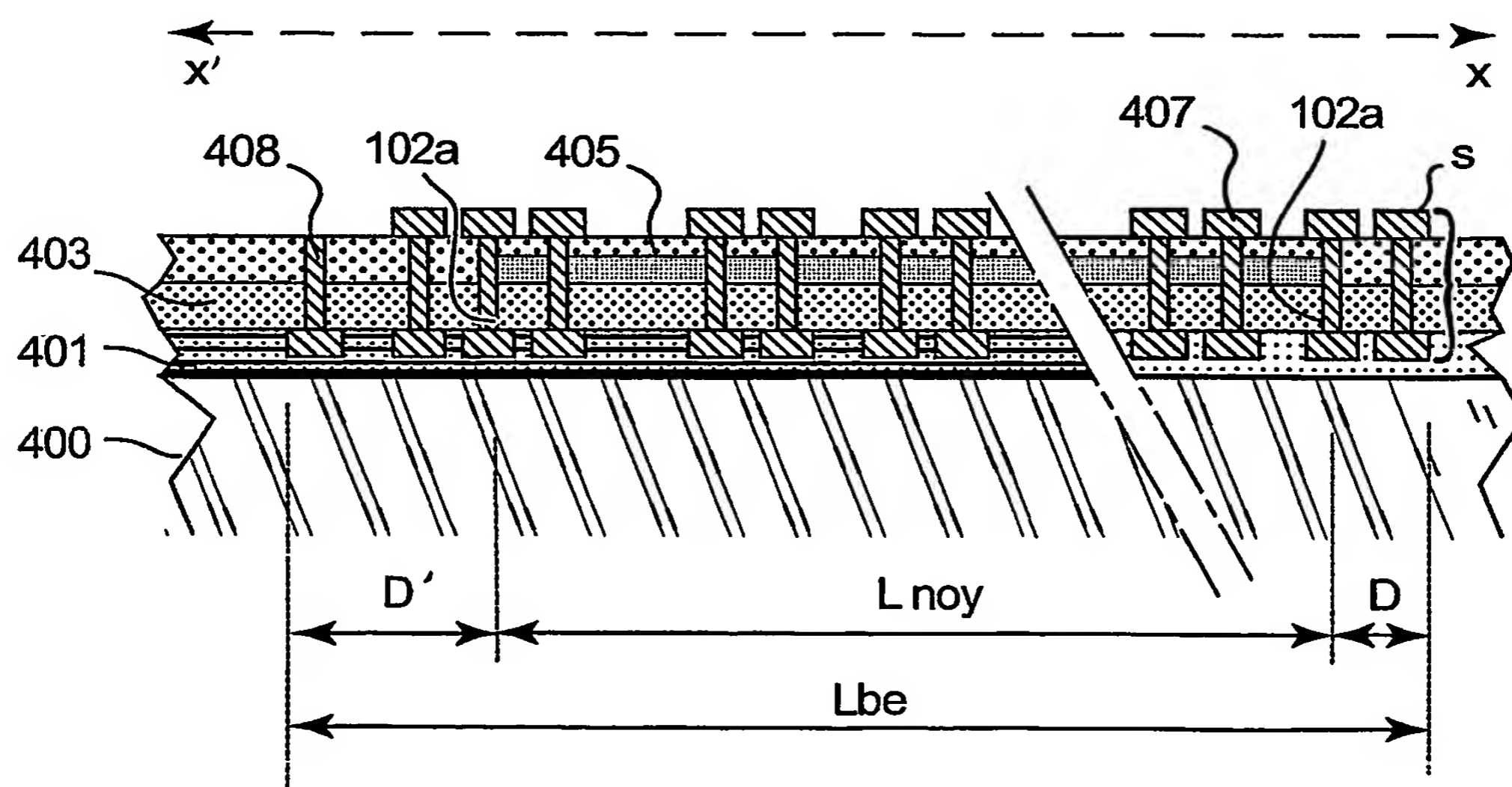


FIG. 5f

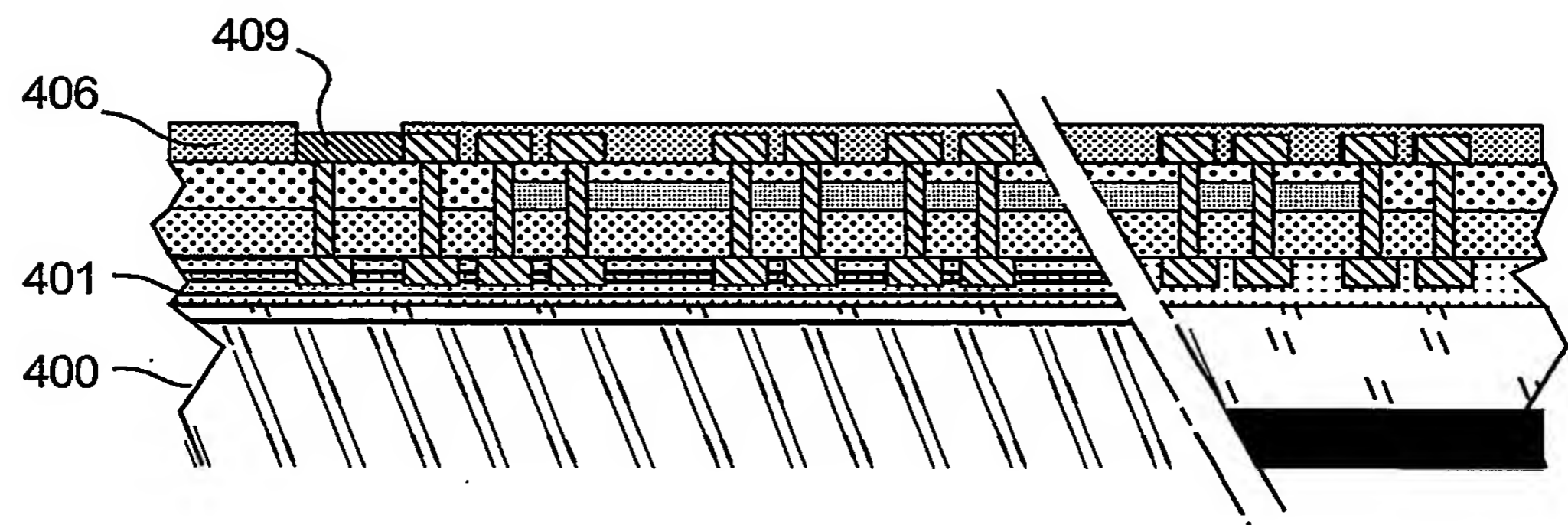


FIG. 5g